第 29 卷　第 7 期　　材　料　研　究　学　报　　Vol. 29 No. 7
2015 年 7 月　　CHINESE JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH　　July 2015

在A6电工铝导线的冷拉拔过程中织构的演变*

吴细毛[1]　和正华[2]　李春和[1]　柳金龙[2]　张　芳[2]　沙玉辉[2]

1. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院 沈阳 110006
2. 东北大学 材料各向异性与织构教育部重点实验室 沈阳 110819

摘 要 用宏微观织构分析方法研究了A6铝导线冷拉拔过程中的织构演变。结果表明, 这种导线在拉拔过程中形成以<111>和<100>丝织构为主的形变织构, 随着变形量的增大<100>织构减少、<111>织构增强。形变织构沿导线的径向呈不均匀分布: 在中等形变量情况下, 从导线表层至中心织构由强<100>织构(体积分数~52%)过渡到强<111>织构(体积分数~55%); 在高应变量情况下, 径向织构梯度减弱, 通体形成强<111>织构(各层的<111>织构体积分数超过70%)。同时, 在拉拔过程中导线心部的硬度比表层的高, 表明织构对导线强度及沿径向分布梯度起重要作用。用调整拉拔工艺可对位错密度和织构及其分布进行优化, 进而提高导线的强度和导电性能。

关键词 金属材料, 织构演变, 拉拔, 铝导线, 微结构

分类号 TG146　　文章编号　1005-3093(2015)07-0555-06

Evolution of Drawing Texture for A6 Aluminum Conductor

WU Ximao[1]　HE Zhenghua[2]　LI Chunhe[1]　LIU Jinlong[2]　ZHANG Fang[2]　SHA Yuhui[2**]

1. Electric Power Research Institute of Liaoning Electric Power Co., Ltd., Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China

2. Key Laboratory for Anisotropy and Texture of Materials (Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang 110819, China

*Supported by State Grid Corporation of China No. DKYKJ[2012]006-2.

Manuscript received December 29, 2014; in revised form April 5, 2015.

**To whom correspondence should be addressed, Tel: (024)83671570, E-mail: yhsha@mail.neu.edu.cn

ABSTRACT Evolution of drawing texture for A6 aluminum conductor with the drawing process was investigated by macro and micro-texture analysis. The results show that the fiber-like deformation texture of <111> and <100> formed in the drawing process, and <100> texture reduced while <111> texture enhanced with the increasing strain. The distribution of deformed texture was of homogeneity along the radial direction of wire: the deform texture transformed from strong <100> texture (~52% volume fraction) in the surface to strong <111> texture (~55%) in the center by moderate strains; the radial gradient texture was weakened and a strong <111> texture (>70%) formed in the overall wire by high strains. Moreover, the core hardness of the wire was higher than that of the surface, which attributed to the texture gradient distribution along the radial. Adjusting the drawing process to optimize the dislocation density and texture as well as their distribution in the wire is an effective route to improve the strength and conductive properties of the A6 aluminum conductor.

KEY WORDS metallic materials, texture evolution, drawing, aluminum conductor, microstructure

随着经济的发展, 电力系统需要提高输电容量和载流量, 发展新型节能输电架空导线[1, 2]。铝及其合金具有比强度高、密度低、导电性好、无磁性和加工成本低等特点, 铝及其合金导线得到了广泛的应用[3, 4]。目前使用的架空导线包括: 钢芯铝绞线、钢绞线、钢芯铜绞线、铝包钢绞线、全铝合金绞线等。高纯铝导线的导电性能最佳, 但是强度偏低。用大变形拉拔加工导致导线强烈的塑性变形, 使纯铝在冷加工过程中产生高密度位错可强化纯铝导线。而塑性变形产生的空位、位错等缺陷导致传导的电子发生散射, 降低电导率。但是研究表明[3], 电工纯铝充分加工硬化后导电率只下降0.5%IACS(远低于杂质元素对导电性的影响), 而抗拉强度却增加近1倍。因此, 用大变形加工硬化制备高导电率硬铝导

* 国家电网公司科技部资助项目DKYKJ[2012]006-2。
2014年12月29日收到初稿; 2015年4月5日收到修改稿。
本文联系人: 沙玉辉, 教授

线, 兼顾了导电性和强度要求。

高导电率硬铝导线的制备包括熔炼铸造和冷拉拔, 即先铸成铝线材, 随后进行连续不同应变量的拉拔加工制成标准导线。由于导线在拉拔过程中发生强烈的塑性变形, 内部的微观组织结构与织构发生显著变化, 从而影响导线的力学性能和导电性能[5]。鉴于导线强度的晶体取向依赖性, 拉拔过程中的织构优化控制对提高纯铝导线性能有重要影响。

面心立方结构(FCC)金属在拉拔过程中形成<111>和<100>方向分别平行于拉拔轴的两种丝织构, <111>和<100>织构的比例随着变形量、层错能、变形温度等因素变化[6-8]。Hibbard[9]报道, 铜和铜合金中<100>织构的强度随着应变的增加而降低, 且<111>是FCC金属更稳定的组分。English等[10]发现, 随着层错能的增大银中的<100>丝织构先增加到90%然后降低。关于变形温度对丝织构影响的研究[11]表明, 在室温下<100>与<111>的比率比在低温和高温时的小, 因此认为<100>丝织构来源于晶粒的再取向或者孪晶。而Stout等[12]未发现再结晶增加<100>以及孪晶明显影响<100>的数量, 并推测强<100>丝织构来源于初始取向。陈建等[13, 14]研究了<111>、<100>和<110>三种取向铜单晶冷拉拔过程的织构演变, 发现在高应变下单晶取向转变为<111>和<100>混合织构。<111>和<100>织构沿径向分布不均匀, 认为与初始取向的稳定性相关, <111>和<100>取向稳定度高于<110>, 其中<100>和<111>取向分别在低应变速率及高应变速率下更稳定。纯铝及铝合金的织构研究, 主要集中在轧制与等通道挤压等制备方法[15, 16]。铝合金导线的拉拔导致<100>丝织构向<111>织构转变[7, 17]。王强等[17]发现了<111>丝织构的形成能进一步提升导线的强度, 但是没有定量表征织构演变对强度的影响。本文将宏观与微观织构分析相结合, 定量研究A6铝导线在冷拉拔过程中的形变织构及其分布的演变规律。

1 实验方法

将直径为9.50 mm的A6电工铝棒(Al≥99.6%, 杂质≤0.03%, 质量分数)在拉丝机上进行11道次室温拉拔, 加工成直径为2.98 mm的单丝铝导线, 总变形量为90.2%。

用数显显微维氏硬度计(HVS-1000B型)测量铝导线的硬度。用X' Pert-PRO型衍射仪按Schulz背反射法进行极图数据的测定, 测试参数为: 钴$K\alpha$靶辐射, 铁滤波片, 管电压为35 kV, 管电流为40 mA。测定每个试样的{111}、{200}、{220}不完整极图, 使用LaboTex织构分析软件计算极图和主要织构组分体积分数。织构测试用试样, 是将铝导线沿直径方向切割后沿拉拔方向紧密平行排列成为尺寸为20 mm×20 mm的组合试样[18], 如图1所示。为了分析线材内部的织构, 用机械和化学方法进行减薄处理, 将直径减至原尺寸的50%。用Channel 5型EBSD系统测定铝导线的微观织构, EBSD样品测试面为垂直于拉拔方向的横截面。

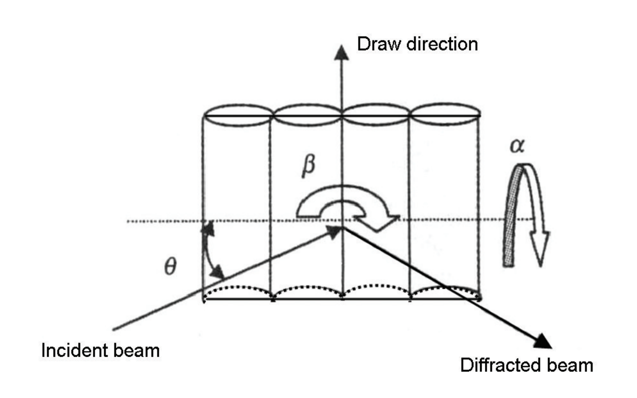


图1 线材宏观织构测量试样的布置示意图

Fig.1 Experimental arrangement of wires for texture measurement

2 结果和讨论

2.1 A6铝导线拉拔过程中宏观织构的演变

如图2所示, A6铝导线在拉拔过程中整体的主要织构组分为{112}<111>和{110}<111>。变形量为51%时织构强度较低, 取向漫散; 变形量为60%~81%时, {112}<111>和{110}<111>织构略有增强; 变形量超过85%时, <111>织构强度显著增强。在拉拔变形过程中<111>织构始终是主要组分, 表明<111>织构为稳定取向。这与铜、铝、金等面心立方金属或合金在大应变冷拉拔时形成<111>织构类似[5-16]。Cu-7.3%Al合金在70%变形量时由强<111>织构和弱<100>织构组成[7, 8]。取向分别为<111>、<100>、<110>的铜单晶, 在应变为0.94、4.12、1.96时<111>成为主导的织构[13, 14]。多晶银拉拔实验结果表明, 在90%应变情况下<111>为主导织构, 而在更大应变条件下转变为<100>织构[8, 11]。

2.2 A6铝导线在拉拔过程中微观织构的演变

为了表征拉拔过程中铝导线织构与组织的演变规律, 用EBSD技术对不同变形量的铝导线进行了微观织构分析。图3给出了不同变形量下导线中心区域的取向成像图(OIM)和反极图(IPF)。很明显, 织构随着变形量的增大表现出明显的差异。变形量为51%时, 中心区域主要形成强<111>织构和弱<110>、<100>织构; 随着拉拔变形量的增大<110>织

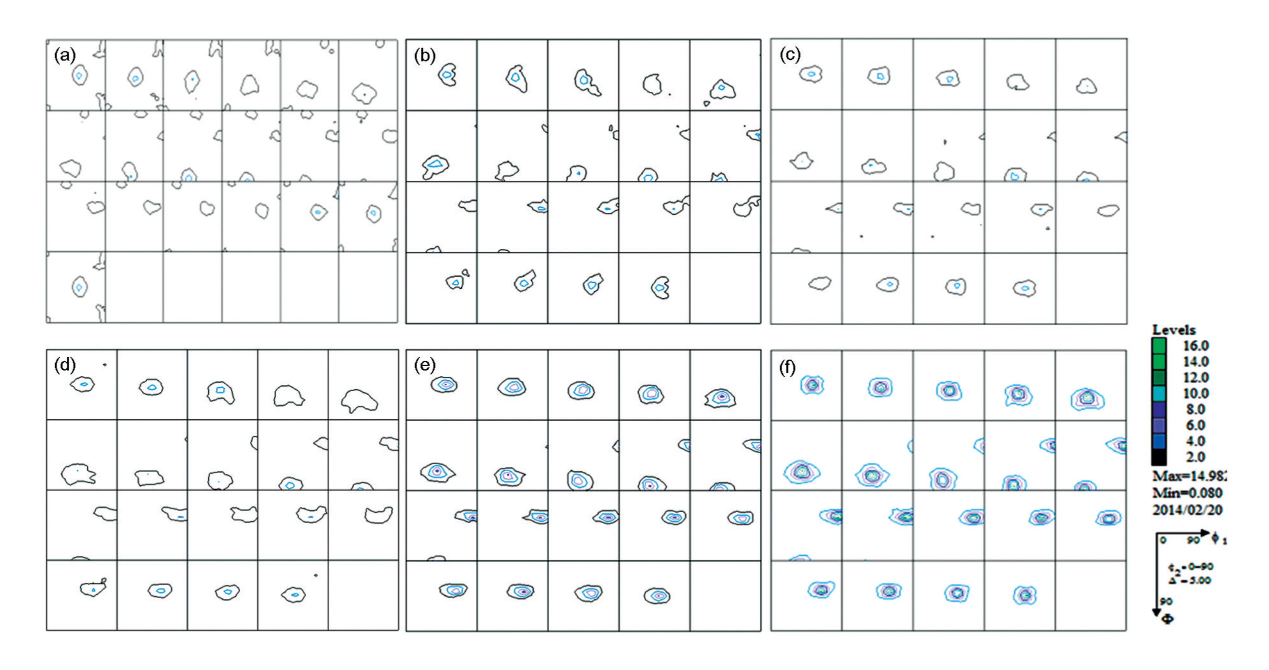


图2 不同变形量A6铝导线的ODF恒φ_2截面图

Fig.2 Constant φ_2 sections of ODFs in A6 aluminum wires with different cold drawn reductions (a) 51%, (b) 61%, (c) 69%, (d) 81%, (e) 85%, (f) 90%

图3 不同变形量A6铝导线中心区域的取向成像图

Fig.3 OIM of cold drawn A6 aluminum wires with various reductions (a) 51%, (b) 61%, (c) 69%, (d) 81%, (e) 85%, (f) 90%

构减少, <100>织构增强; 当变形量达到69%和81%时, 主要织构组分为<100>和<111>; 随着变形量的继续增大<100>织构减少, <111>织构增强; 当变形量达到90%时<111>织构优势进一步加强, 处于主导地位。

图4进一步给出了拉拔过程中各主要织构组分体积分数的变化。<110>织构体积分数随着变形量的增加而持续降低, 成为弱织构组分; <100>织构体积分数先升高而后降低, 约70%变形时达到峰值, 而<111>织构在拉拔变形中后期显著增加。对FCC材料拉拔织构的研究结果表明, 中高层错能面心立方金属在冷拉拔过程中形成稳定的<111>和<100>织构。其它不稳定取向有向<111>和<100>转动的趋势。本文拉拔变形量在51%−69%的范围内时, <110>织构在拉拔过程中转变为<111>和<100>织构。拉拔变形量增大时<100>织构向<111>织构转变, 最终形成更为稳定的强<111>织构。这表明, 在拉拔过程中<110>取向稳定性弱于<100>和<111>取向, 而<111>织

构在高应变条件下最为稳定。铜单晶在拉拔过程中也表现出相近的织构演变规律[13]。

2.3 A6铝导线微观织构的径向梯度分布

从图5可见, 铝导线沿径向从表层到中心的形变织构具有明显的梯度分布特征。变形61%时表层形成强<100>织构和相对较弱的<111>织构, OIM图呈现出大面积的<100>和近<100>取向; 过渡层(1/2半径处)<100>织构明显减弱, 转变为<111>取向; 中心层则形成强<111>以及弱<100>织构。变形量增加到90%时形变态组织显著细化, 沿径向各层均为强<111>和较弱的<100>织构特征, 如图6所示。图7a定量统计了两个变形量下各织构组分沿导线径向的分布。结果表明, 61%变形量时<100>和<110>体积分数由表层至中心层逐渐降低, 而<111>分数则是

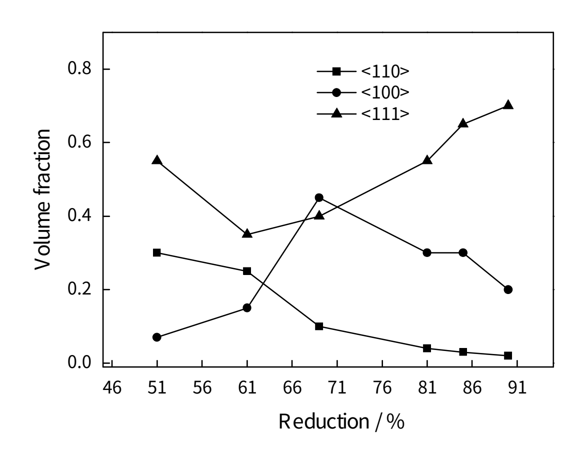


图4 A6铝导线织构的体积分数随着变形率的变化

Fig.4 Variation of volume faction of fiber textures with reductions in the cold drawn A6 aluminum wires

由表层至中心层逐渐提高。表层和过渡层中<100>为最强组分, <110>和<111>接近; 中心层中<111>占据主导地位, 其后依次为<100>和<110>。变形量为90%时各主要织构组分沿径向分布基本均匀, 各层<111>体积分数均超过70%, <110>含量极少。图7b给出了各个变形量下沿径向不同位置的硬度值。可以看出, 硬度值随着变形量增大而提高, 煅烧提高的速度逐渐趋缓, 同时沿径向不同层间的硬度梯度也逐渐减小。

织构梯度, 是沿线材径向应变分布的差异导致的[18, 19]。在拉拔过程中变形几何以及线材与模具之间的摩擦导致沿径向的剪切应力分布不均匀, 从而导致变形区内应力状态沿径向存在梯度分布。线材中心层主要受包括拉应力和压应力的平面应力作用, 表层除了受拉应力、压应力作用外, 还受到摩擦力及金属流变所产生的剪切应力, 导致线拉拔过程中变形的不均匀性, 最终使各层织构存在差异[18]。Li等[20]和Park等[21]认为, 在拉拔丝中心的剪切应变可以忽略, 而随着由中心向表层的位置变化剪切应变明显增大。铜单晶的拉拔实验结果[14]表明, 在高应变条件下大多数<100>织构来自于表层剪切应力的作用, 而中心层极低的剪切应力导致<111>取向在中心层比较稳定。铜合金中[9, 11]<100>织构强度随着应变的增加而降低, 且<111>是更稳定的组分。在多晶纯铝丝的拉拔过程中表层受到较大的摩擦力和剪切应力, 形成较大的剪切应变, 并导致强<100>织构的形成。但是<100>织构为亚稳取向, 随着变形量

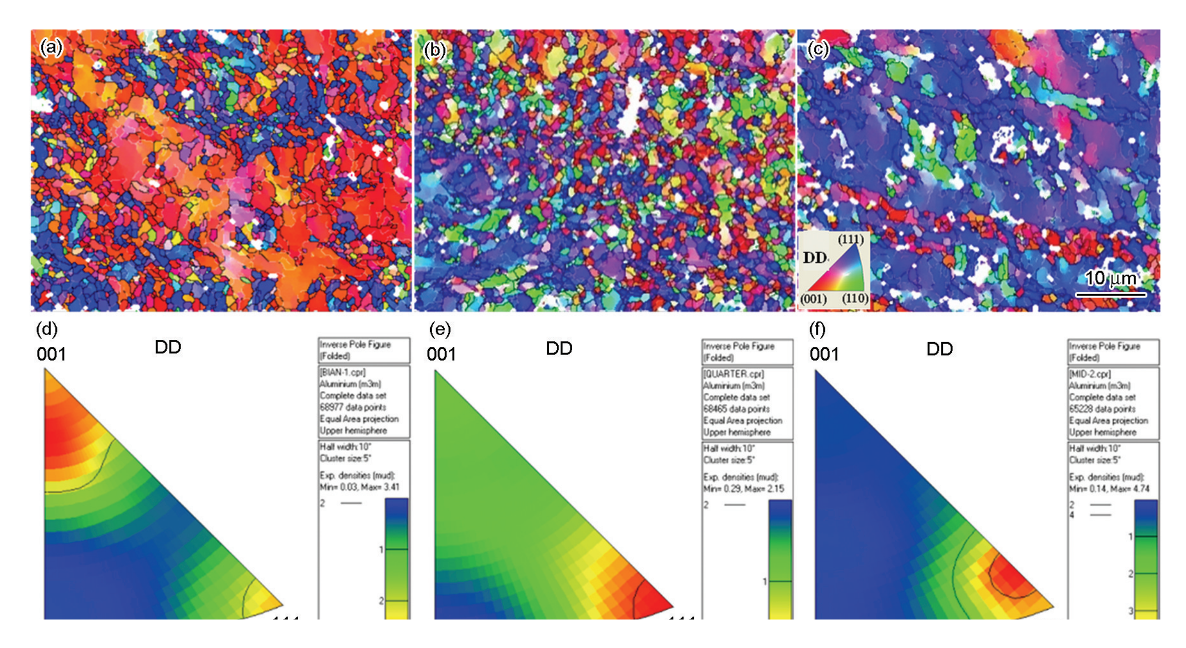
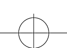


图5 61%变形量A6铝导线不同厚度层的取向成像图和反极图

Fig.5 OIM and inverse pole figure of 61% cold drawn A6 aluminum wires in vary regions: (a, d) surface, (b, e) transition region, (c, f) center



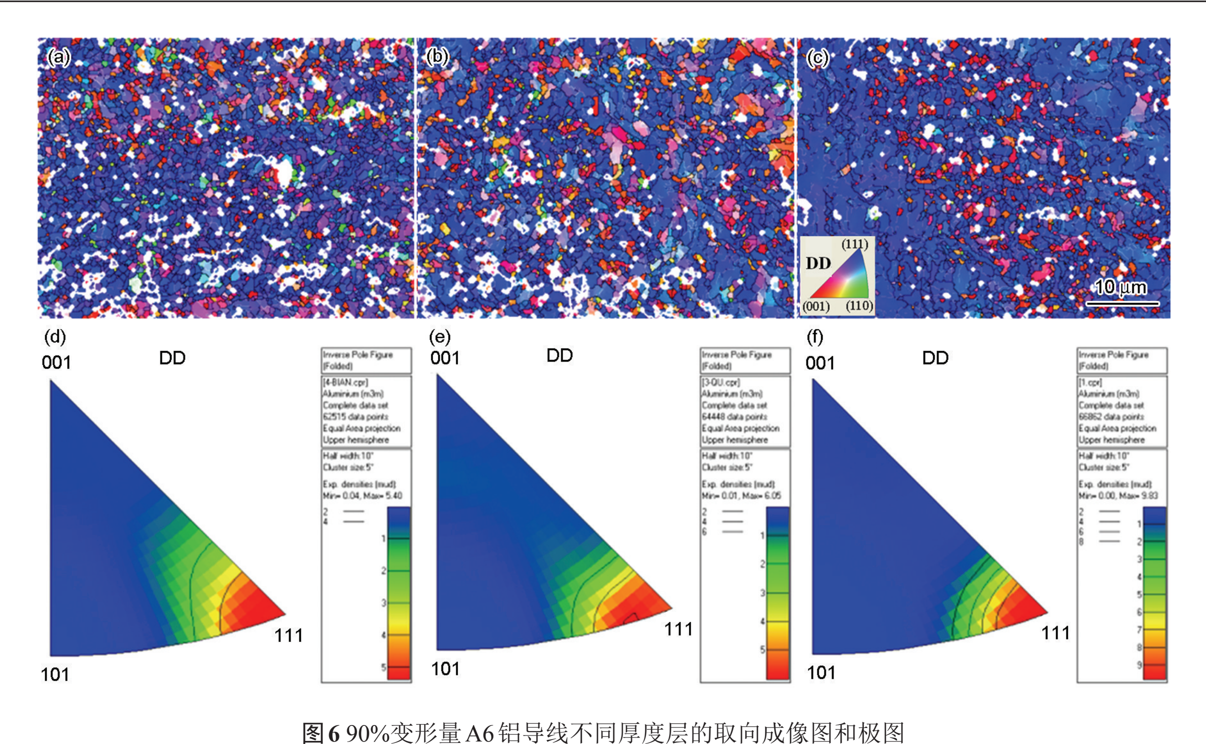


图 6 90%变形量 A6 铝导线不同厚度层的取向成像图和极图

Fig.6 OIM and {100} pole figure of 90% cold drawn A6 aluminum wires in vary regions (a, d) surface, (b, e) transition region, (c, f) center

图 7 A6 铝导线不同区域织构的体积分数和显微硬度随着变形率的变化

Fig.7 Variation of volume faction of fiber texture (a) and micro-hardness (b) with reductions in different regions of the cold drawn A6 aluminum wires

的增大会逐渐转变为<111>织构; 中心区域主要为平面应变, <111>织构逐渐增强。而陈建等[13, 14]认为, 织构沿径向的不均匀分布归因于取向的稳定性差异, <111>和<100>取向稳定度高于<110>, 其中<100>和<111>取向分别在低应变速率及高应变速率下更稳定。

在拉拔过程中沿径向不同位置处的硬度值演变, 由沿径向的应变分布和织构分布共同决定。因为存在着由中心到表层逐渐加强的剪切应变, 表层的等效应变高于心部。随着拉拔进入高应变量范围, 等效应变的梯度分布趋于减弱。同时, 织构的梯度分布也趋于减弱, 不同层间的<111>丝织构分数差异显著缩小。这两方面因素共同作用, 使硬度沿径向的梯度分布减小。值得注意的是, 在拉拔过程中, 导线心部的硬度始终高于表层。由于剪切应变的作用表层的等效应变高于心部, 即表层具有更大的应变硬化效应。因此, 心部较高的硬度归因于强<111>织构的取向硬化效应。综上所述, 在拉拔过程中带材表层的剪切应变有利于提高导线的应变硬化速率, 加强应变硬化效应。同时, 剪切应变阻碍<111>织构的通体强化, 降低了硬取向增加的速率, 减弱了取向硬化效应。

在变形初始阶段, 变形量小于 50%时通过位错的滑移和相互作用实现基体的形变, 位错密度的快

速增加导致强度的升高; 当变形量超过50%位错密度达到饱和时, 导线中丝织构的形成是强度和硬度提高的主要原因[17], 而线材径向的织构梯度以及硬度变化归因于应变分布差异。

3 结 论

1. 在A6铝导线冷拉拔的初期<110>和其它取向的晶粒向<111>和<100>织构转动, 在变形后期<100>织构向稳定取向<111>织构转动。

2. 从导线的表层到中心呈现织构梯度, 其分布特征受到变形量的显著影响。中等变形量(61%)时织构由从带材表层强<100>织构过渡到中心的强<111>织构, 高变形量(90%)时从表层到中心通体形成强<111>织构。织构梯度的形成和演变, 归因于拉拔过程中沿导线径向的应变分布梯度的变化。

3. 从导线表层到中心的硬度有明显的径向梯度, 心部的硬度高于表层, 其差异随着拉拔变形量的增大而逐渐减小。硬度的梯度特征与织构梯度以及位错密度梯度相关联, 织构的梯度起主导作用。

参 考 文 献

1 LIU Bin, ZHENG Qiu, DANG Peng, ZENG Wei, Development and applications of aluminum alloy in overhead lines, Electric Wire & Cable, **4**, 10(2012)
(刘 斌, 郑 秋, 党 朋, 曾伟, 铝合金在架空导线领域的应用及发展, 电线电缆, **4**, 10(2012))

2 DING Guangxin, SUN Zhusen, ZHANG Qiang, LI Ming, MO Juan, YE Hongsheng, WANG Gang, WAN Jiancheng, Analysis on application of energy-saving conductors in transmission lines, Power System Tech., **8**, 24(2012)
(丁广鑫, 孙竹森, 张 强, 李 明, 莫 娟, 叶鸿声, 王 钢, 万建成, 节能导线在输电线路中的应用分析, 电网技术, **8**, 24(2012))

3 SU Guanghua, Effect of cold drawing on conductivity of aluminum wire with rare earth, The Chinese Journal of Nonferrous Metals, **8**, 249(1998)
(苏光华, 拉拔加工对稀土铝导线导电率的影响, 中国有色金属学报, **8**, 249(1998))

4 T. Kobayashi, Strength and fracture of aluminum alloys, Mater. Sci. Eng., A, **286**, 333(2000)

5 L. Chevalier, Prediction of defects in metal forming: application to wire drawing, J. Mater. Process. Tech., **32**, 145(1992)

6 N. Inakazu, Y. Kaneno, H. Inoue, Fiber texture formation and mechanical properties in drawn fine copper wire, Mater. Sci. Forum, **715**, 157(1994)

7 S. Y. Kim, C. H. Choi, D. N. Lee, Deformation and annealing textures of drawn aluminum bronze wires, Mater. Sci. Forum, **408**, 913 (2002)

8 D. N. Lee, Effect of stacking fault energy on evolution of recrystallization textures in drawn wires and rolled sheets, Mater. Sci. Forum, **495**, 1243(2005)

9 W. R. Hibbard, Deformation texture of drawn face centered cubic metal wires, Trans AIME, **77**, 581(1950)

10 A. T. English, G. Y. Chin, On the variation of wire texture with stacking fault energy in f.c.c. metals and alloys, Acta Metall., **13**, 1013(1965)

11 H. J. Shin, H. T. Jeong, D. N. Lee, Deformation and annealing textures of silver wire, Mater. Sci. Eng., A, **279**, 244(2000)

12 M. G. Stout, J. A. Orourke, Experimental determination textures of OFE copper and 70: 30 brass from wire drawing, compression and torsion, Metall. Mater. Trans. A, **20**, 125(1989)

13 J. Chen, W. Yan, C. X. Liu, R. G. Ding, X. H. Fan, Dependence of texture evolution on initial orientation in drawn single crystal copper, Mater. Character., **62**, 237(2011)

14 CHEN Jian, YAN Wen, CHEN Shaokai, WANG Xueyan, PENG Yuli, FAN Xinhui, Substructure formed in cold drawn processing for single crystal cooper wires, Rare Metal. Mater. Eng., **36**(11), 1896 (2007)
(陈 建, 严 文, 陈绍楷, 王雪艳, 彭渝莉, 范新会, 单晶铜线材在冷拔过程中形成的亚结构, 稀有金属材料与工程, **36**(11), 1896 (2007))

15 S. Wronski, B. Bacroix, Microstructure evolution and grain refinement in asymmetrically rolled aluminium, Acta Mater., **76**, 404 (2014)

16 S. D. Terhune, D. L. Swisher, K. Ohishi, Z. Horita, T. G. Langdon, T. R. Mcnelley, An investigation of microstructure and grain boundary evolution during ECA pressing of pure aluminum, Metall. Mater. Trans. A, 33A, 2173(2002)

17 WANG Qiang, WU Ximao, LI Chunhe, DUAN Qiqiang, YANG Enna, ZHANG Guangping, ZHANG Zhefeng, Mechanical properties of A6 aluminum conductor in drawing process, Chinese Journal of Materials Research, **27**(3), 269(2013)
(王 强, 吴细毛, 李春和, 段启强, 杨恩娜, 张广平, 张哲峰, 拉拔工艺对A6工业纯铝导线力学性能的影响, 材料研究学报, **27**(3), 269(2013))

18 LIU Yandong, JIANG Qiwu, ZHAO Xiang, ZUO Liang, LIANG Zhide, Texture and analysis and simulation of pearlitic wires during drawing, **38**(11), 1215(2002)
(刘沿东, 蒋奇武, 赵 镶, 左 良, 梁志德, 拉拔过程中珠光体钢丝帘线的织构分析与模拟, 金属学报, **38**(11), 1215(2002))

19 P. N. Kalu, L. Brandao, F. Ortiz, O. Egungwu, F. Ige, On the texture evolution in swaged Cu-based wries, Scripta Mater., **38**(12), 1755 (1998)

20 S. Li, S. He, A. V. Bael, P. V. Houtte, FEM-aided Taylor simulations of radial texture gradient in wire drawing, Mater. Sci. Forum, **408**, 43(2002)

21 H. Park, D. H. Lee, Effects of shear strain and drawing pass on the texture development in copper wire, Mater. Sci. Forum, **408**, 637 (2002)

